

## Сигналы автодинных модулей с внешним детектированием

*В.Я. Носков<sup>1</sup>✉, С.М. Смольский<sup>2</sup>, К.А. Игнатков<sup>1</sup>, А.П. Чупахин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; e-mail: noskov@oko-ek.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия; e-mail: smolskiysm@mail.ru

**Аннотация.** Разработана математическая модель автодинного приемопередающего модуля, связанного с антенной через одну или две детекторные секции. Получены основные соотношения для расчета его сигнальных характеристик при регистрации сигналов в цепи питания генератора и с помощью внешних детекторов. Показаны особенности формирования сигналов с внешних детекторов. Установлено, что их относительные фазовые сдвиги зависят как от величины коэффициента автодинного усиления генератора, так и от фазового расстояния между секциями. В случае высокого значения коэффициента автодинного усиления оба сигнала на выходе детекторов находятся в фазе. В случае малой величины коэффициента автодинного усиления на выходе диодов реализуется определенный сдвиг фаз между сигналами. Величина этого сдвига определяется относительным разносом между диодами в детекторных секциях. Получены условия формирования квадратурных сигналов. Экспериментальные данные получены на примере генераторных модулей, выполненных на диодах Ганна 8-мм диапазона.

**Ключевые слова.** Автодин, автодинный датчик, автодинный сигнал, внешнее детектирование

## Signals of autodyne modules with external detection

*Vladislav Ya. Noskov<sup>1</sup>✉, Sergey M. Smolskiy<sup>2</sup>, Kirill A. Ignatkov<sup>1</sup>,  
Andrey P. Chupahin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; noskov@oko-ek.ru

<sup>2</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia; e-mail: smolskiysm@mail.ru

**Abstract.** The mathematical model of the autodyne transceiver module, which is connected with an antenna through the one or two detector sections, is developed. The main mathematics for calculation of its signal characteristics at signal registration in the power supply circuit and with the help of external

detectors, are obtained. The features of signal formation are demonstrated with external detectors. It is proved that their relative phase shifts depend both on the value of the autodyne amplification factor and on the phase distance between sections. In the case of the high autodyne amplification factor, both signals at the detector outputs are in-phase. In the case of low autodyne amplification factor, the definite phase shift between signals is realized on the diode outputs. The value of this phase shift is defined by the relative separation between diodes in the detector sections. Conditions of quadrature signal formation are obtained. Experimental data are obtained on the example of oscillation modules fulfilled on Gunn diodes of the 8mm-range.

**Keywords.** Autodyne, autodyne sensor, autodyne signal, external detection

## 1. Введение

Задача дистанционного и бесконтактного определения пространственного положения, скорости, пройденного пути и направления движения объектов часто возникает в промышленности и энергетике, на транспорте и в научных исследованиях [1–4]. Во многих применениях она решается с помощью радиолокационных датчиков, выполненных на основе автодинных приемо-передающих модулей [5–10].

Основой этих модулей является автодинный генератор (просто автодин). Отклик автодина на воздействие собственного отраженного от объекта локации излучения состоит в изменениях амплитуды и частоты колебаний. При этом из-за нелинейности характеристики активного элемента (АЭ) в автодине происходят изменения также параметров смещения (тока, напряжения) в цепи питания. В большинстве автодинов регистрация этих изменений используется для получения сигналов. Необходимо отметить, что достоинством автодинов с регистрацией сигналов в цепи питания является возможность применения любого СВЧ генератора без каких-либо переделок. Кроме того, простота конструкции и низкая стоимость таких модулей являются привлекательными во многих применениях. Однако присутствие шумов источника питания в цепи регистрации сигналов существенно снижает чувствительность автодина и энергетический потенциал радиолокационного датчика [11].

Для устранения указанного недостатка предложен ряд технических решений, основанных на использовании в модулях дополнительных детекторных секций, реализующих известный принцип «внешнего детектирования». Эти решения, хотя и несколько усложняют конструкцию и схему автодина, обеспечивают улучшение их шумовых параметров на 10...15 дБ [12]. Из литературы известны различные варианты автодинных модулей, в которых детекторные секции устанавливаются либо в задней части генераторной камеры относительно антенны, либо спереди, между автодином и антенной [7–9; 12–15]. Последний вариант, как известно [10], обеспечивает не только улучшение шумо-

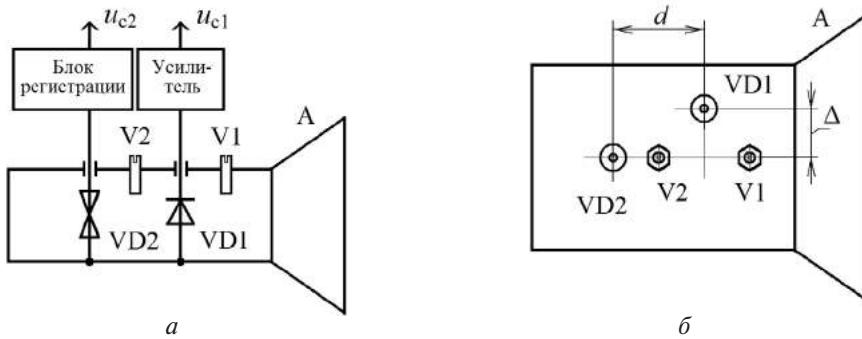
вых параметров, но и расширение функциональных возможностей радиолокационных датчиков. Например, с помощью внешних детекторов можно получать квадратурные сигналы, которые обеспечивают возможность определять направления движения объекта локации. Кроме того, обработка этих сигналов современными сигнальными процессорами позволяет значительно повысить точность измерения параметров движения.

Несмотря на большое число изобретений СВЧ модулей с внешним детектированием, анализу работы этих устройств посвящено сравнительно малое число публикаций. При этом в известных нам работах рассмотрены лишь общие принципы построения модулей без учета реакции автогенератора на воздействие отраженного излучения, например, в виде автодинных изменений частоты генерации. Учет этих изменений, как известно, является принципиально важным фактором при описании автодинных сигналов, выборе оптимального режима работы СВЧ генератора и обработке полученных сигналов [11; 16]. В связи с этим целью настоящей статьи является исследование особенностей формирования сигналов в автодинных модулях с внешним детектированием с учетом отмеченных факторов. Основные результаты этой работы обсуждались на 27-й и 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» [17; 18].

## 2. Основные выражения и их анализ для случая одного детекторного диода

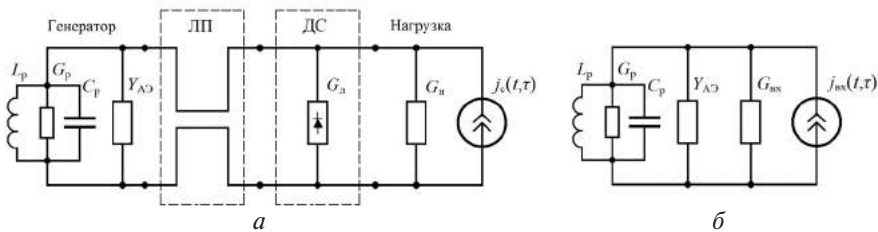
На рис. 1, *а* приведена функциональная схема автодинного датчика, в котором производится выделение двух сигналов:  $u_{c1}$  и  $u_{c2}$ . Первый выделяется с помощью детекторного диода VD1 и усиливается усилителем, а второй выделяется в цепи смещения генераторного диода VD2 с помощью блока регистрации [19]. Изменением расстояния  $d$  между диодами (см. рис. 1, *б*) обычно регулируется фазовый сдвиг между сигналами, а смещением местоположения диода VD1 относительно оси волновода на величину  $\Delta$  — коэффициент связи. Известны и другие конструкции автодинных модулей [12], в которых реализован аналогичный принцип построения.

На рис. 2, *а* представлена эквивалентная схема анализируемого модуля. Схема содержит последовательное соединение секции собственно СВЧ генератора, детекторную секцию ДС и нагрузку. Модуль содержит колебательную систему (КС) в виде параллельного соединения эквивалентных СВЧ резонатору индуктивности  $L_p$ , емкости  $C_p$ , проводимости потерь  $G_p$  и среднюю за период колебаний проводимость АЭ  $Y_{AЭ} = G_{AЭ}(A, \omega) + jB_{AЭ}(A, \omega)$ , зависящую от амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний.



**Рис. 1.** Функциональная схема автодинного модуля (а) и его вид (б) со стороны широкой стенки волновода

**Fig. 1.** The functional diagram of the autodyne module (a) and its schematic view (b) from the side of wider waveguide wall



**Рис. 2.** Эквивалентная схема автодинного модуля с внешним детектором со стороны антенны (а) и она же (б), приведенная к сечению АЭ

**Fig. 2.** The equivalent diagram of the autodyne module with the external detector from the antenna side (a) and the same diagram (b) reduced to the AE section

Четырехполюсник в виде линии передачи ЛП протяженностью  $d$  без потерь имеет постоянную распространения  $\beta_v = 2\pi/\Lambda_v$ , где  $\Lambda_v$  — длина волны в ЛП с волновой проводимостью  $Y_0$ . Секция ДС на рис. 2, а представлена средней за период колебаний резистивной проводимостью детектора  $G_d$ . При этом реактивной составляющей адмиттанса диода мы пренебрегаем.

Нагрузкой СВЧ генератора является входная проводимость  $Y_n = G_n$  согласованной антенны. Действие отраженной от объекта локации волны представлено на схеме рис. 2, а эквивалентным генератором сигнального тока  $j_s(t, \tau)$ . Здесь  $\tau = 2l/c$  — время распространения излучения до отражающего объекта и обратно в свободном пространстве;  $l$  — расстояние до отражателя;  $c$  — скорость распространения излучения. При этом полагаем, что четырехполюсник ЛП согласован со стороны нагрузки:  $Y_0 = G_n + G_d$ . Тогда цепь, находящуюся правее плоскости сечения АЭ, представим в виде параллельного соединения ее входной проводимости  $G_{вх} = (G_n + G_d)$  и источника входного тока  $j_{вх}(t, \tau)$  (см. рис. 2, б).

Учитывая обычно достаточно высокое значение нагруженной добротности КС  $Q_H \gg 1$ , где  $Q_H = \omega_c C_p / G$ ;  $G = G_p + G_{\text{вх}}$ ,  $\omega_c = (LC)^{-1/2}$  – собственная частота КС, полагаем, что колебания на АЭ являются квазигармоническими:  $u(t) = \text{Re}[A(t) \exp j\Psi(t)]$ . Здесь  $\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi$  – полная фаза колебаний;  $A = A(t)$ ,  $\varphi = \varphi(t)$  – медленно меняющиеся значения амплитуды и фазы в текущий момент времени  $t$ . Принятые от объекта локации колебания и прошедшие в КС, являются также квазигармоническими:  $j_{\text{вх}} = \text{Re}J_{\text{вх}}(t, \tau) \exp j\Psi_{\text{вх}}(t, \tau)$ , где  $J_{\text{вх}}(t, \tau) = J_c(t, \tau)$ ,  $\Psi_{\text{вх}}(t, \tau)$  – амплитуда и фаза колебаний из предыстории системы:  $t - \tau$ ;  $J_c(t, \tau) = [8G_H P_c]^{1/2}$ ;  $P_c = \Gamma^2 P$  – мощность отраженного от объекта излучения;  $P = A^2 G_H / 2$  – выходная мощность на нагрузке  $G_H$ ;  $\Gamma$  – коэффициент, характеризующий затухание СВЧ излучения по амплитуде при его распространении до объекта и обратно. С учетом сделанных замечаний запишем:

$$\text{Re}[\dot{A}Y_{\text{АЭ}}] + \text{Re}[\dot{A}Y_{\text{КС}}] = j_{\text{вх}}(t, \tau), \quad (1)$$

где  $Y_{\text{КС}} = G[1 + j2Q_H(\omega - \omega_c)/\omega_c]$  – адмиттанс КС.

Для получения укороченных уравнений возмущенного генератора, следуя методу медленно меняющихся амплитуд в изложении Курокавы [20], в (1) сделаем замену  $\omega$  на выражение  $\omega_0(1 + \chi) - j(1/A)(dA/dt)$ , где  $\chi = (1/\omega_0)(d\varphi/dt) = \Delta\omega/\omega_0$  – относительные и  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$  – абсолютные изменения частоты колебаний. Здесь, в силу медленности  $\varphi(t)$  и  $A(t)$ , величины  $(d\varphi/dt)$  и  $(1/A)(dA/dt)$  являются достаточно малыми по сравнению с частотой  $\omega_0$ . Тогда в новых переменных (1) перепишем в виде:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{2GQ_H}{\omega_c} \frac{1}{A_0} \frac{dA}{dt} + G_{\text{АЭ}} + G_{\text{КС}} \right) A \cos(\omega_0 t + \varphi) - \\ & - \left( \frac{2GQ_H}{\omega_c} \frac{d\varphi}{dt} + B_{\text{АЭ}} + 2GQ \frac{\omega - \omega_c}{\omega_c} \right) A \sin(\omega t + \varphi) = j_{\text{вх}}(t, \tau). \end{aligned} \quad (2)$$

Далее, после умножения (2) на функции  $\cos(\omega_0 t + \varphi)$ , затем, на  $\sin(\omega_0 t + \varphi)$ , соответственно, и усреднения за период колебаний получим укороченные уравнения для амплитуды  $A$  и фазы  $\varphi$  в виде:

$$\frac{2G_{\text{КС}}Q_H}{\omega_c} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + G_{\text{АЭ}} + G_{\text{КС}} = 2\Gamma\eta G_{\text{КС}} \cos[\delta(t, \tau) + 2\beta_s d], \quad (3)$$

$$\frac{2G_{\text{КС}}Q_H}{\omega_c} \frac{d\varphi}{dt} + B_{\text{АЭ}} + 2G_{\text{КС}}Q_H \frac{\omega - \omega_c}{\omega_c} = -2\Gamma\eta G_{\text{КС}} \sin[\delta(t, \tau) + 2\beta_s d], \quad (4)$$

где  $\eta = Q_H/Q_{\text{вн}}$ ,  $Q_{\text{вн}}$  – КПД и внешняя добротность КС;  $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$  – набег фазы отраженного излучения за время  $\tau$ . В данном случае фаза  $\delta(t, \tau)$  после усреднения стала также медленно меняющейся функцией за период  $T = 2\pi/\omega_0$  колебаний.

Трудность нахождения аналитического решения системы (3), (4) состоит в наличии нелинейных зависимостей всех его слагаемых от параметров автоколебаний. Проводимость  $Y_{AЭ} = G_{AЭ} + jB_{AЭ}$ , как отмечалось выше, зависит от амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний СВЧ генератора:  $Y_{AЭ}(A, \omega)$ . Проводимость  $Y_{КС}$  является зависимой от частоты  $\omega$ , изменения которой также существенно влияют на закон формирования автодинного отклика.

Для облегчения анализа системы (3), (4) заменим нелинейные члены проводимостей  $Y_{КС}$  и  $Y_{AЭ}$  их квазилинейной аппроксимацией в окрестности режима стационарных колебаний и будем рассматривать происходящие в автодине процессы от воздействия отраженного излучения в относительных вариациях этого режима. При этом сигнал автодетектирования будем регистрировать по изменению величины среднего значения тока АЭ  $I = I(A, \omega)$ , полагая напряжение смещения на АЭ неизменным.

Для этого из системы (3), (4) при равенстве  $\Gamma = 0$  находим сначала уравнения стационарного режима колебаний, полагая производные равными нулю и  $A = A_0$ ,  $\omega = \omega_0$ , где  $A_0$ ,  $\omega_0$  – амплитуда и частота стационарных колебаний:

$$\begin{aligned} G_{AЭ0}(A_0, \omega_0) + G_{КС}(\omega_0) &= 0, \quad B_{AЭ0}(A_0, \omega_0) + B_{КС}(\omega_0) = 0, \\ I_0 &= I(A_0, \omega_0), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $B_{КС}(\omega_0) = 2GQ_n(\omega_0 - \omega_c)/\omega_c$  – реактивная проводимость КС. Данные уравнения стационарного режима, хорошо известные в теории СВЧ генераторов [20], позволяют определить амплитуду  $A_0$  и частоту  $\omega_0$  автономного генератора.

Для нахождения уравнений в вариациях для автодинного отклика СВЧ генератора представим амплитуду и частоту автоколебаний в виде:  $A = A_0 + \Delta A$ ,  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ , где  $\Delta A$ ,  $\Delta\omega$  – соответствующие вариации стационарного режима генератора. При этом полагаем эти приращения достаточно малыми  $\Delta A \ll A_0$ ,  $\Delta\omega \ll \omega_0$ . Входящие в (3), (4) параметры  $G_{AЭ}$  и  $B_{AЭ}$  при этом в окрестности своих стационарных значений (5) под воздействием отраженного излучения получают соответствующие изменения.

Кроме того, учтем в вариациях явление автодетектирования, при котором благодаря изменениям среднего значения тока  $I = I(A, \omega)$  АЭ обеспечивается возможность выделения выходного сигнала автодина в цепи смещения АЭ по изменению тока:  $\Delta I = I - I(A_0, \omega_0) \equiv I - I_0$ . При этом полагаем, что  $\Delta I \ll I_0$ .

Допуская линейность зависимостей  $G_{AЭ}(A, \omega)$ ,  $B_{AЭ}(A, \omega)$  и  $I(A, \omega)$  от амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний в окрестности стационарного режима запишем указанные параметры с учетом первых двух членов разложений в ряды Тейлора:

$$I = I_0 + \left( \frac{\partial I}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left( \frac{\partial I}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega, \quad (6)$$

$$G_{AЭ} = G_{AЭ0} + \left( \frac{\partial G_{AЭ}}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left( \frac{\partial G_{AЭ}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega, \quad (7)$$

$$B_{AЭ} = B_{AЭ0} + \left( \frac{\partial B_{AЭ}}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left( \frac{\partial B_{AЭ}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega. \quad (8)$$

Здесь и далее индекс «0» при частных производных означает, что они получены в окрестности стационарного режима.

Подставляя (6) – (8) в (3), (4) и равенство  $I(A, \omega)$ , учитывая при этом (5), получим систему линеаризованных уравнений для определения относительных вариаций амплитуды  $a = \Delta A / A_0$  и частоты генерации  $\chi = \Delta \omega / \omega_0$ , а также относительной величины выходного сигнала автодетектирования  $i = \Delta I / I_0$  в виде:

$$i = \alpha_{01} a + \varepsilon_{01} \chi, \quad (9)$$

$$\frac{Q_h}{\omega_c} \frac{da}{dt} + \alpha_{11} a + \varepsilon_{11} \chi = \eta \Gamma \cos[\delta(t, \tau) + 2\beta_b d], \quad (10)$$

$$\frac{Q_h}{\omega_c} \frac{d\varphi}{dt} + \beta a + Q_h \chi = -\eta \Gamma \sin[\delta(t, \tau) + 2\beta_b d]. \quad (11)$$

Для нахождения решения системы (9) – (11) полагаем, что период автодинного сигнала  $T_a \gg \tau$ , а время установления автодинного отклика  $\tau_a = Q_h / \alpha_{11} \omega_c \ll T_a$ . Первое допущение позволяет записать:  $\delta(t, \tau) = \delta(\tau)$ , а второе – дает основание для нахождения квазистатического решения [21]. Для этого, полагая в (10) и (11)  $da/dt = d\varphi/dt = 0$ , получим соответствующие выражения для нормированных автодетекторной, амплитудной  $a_h(t)$ , частотной  $\chi_h(t)$  и фазовой  $\delta(\tau)$  характеристик АД:

$$i_h(t) = i(t) / \Gamma K_0 = \cos[\delta(\tau) + 2\beta_b d - \psi_0], \quad (12)$$

$$a_h(t) = a(t) / \Gamma K_a = \cos[\delta(\tau) + 2\beta_b d - \psi_1], \quad (13)$$

$$\chi_h(t) = \chi(t) / \Gamma L_a = -\sin[\delta(\tau) + 2\beta_b d + \theta], \quad (14)$$

$$\delta(\tau) = \omega(t)\tau = \omega_0 \tau - C_{OC} \sin[\delta(\tau) + 2\beta_b d + \theta], \quad (15)$$

$$\text{где } K_0 = \eta \frac{\alpha_{01}(1 - \kappa_{чд}\gamma)}{\alpha_{11}(1 - \gamma\rho)} \sqrt{1 + \kappa_{см}^2}, \quad K_a = \frac{\eta \sqrt{1 + \rho^2}}{\alpha_{11}(1 - \gamma\rho)}, \quad L_a = \frac{\eta \sqrt{1 + \gamma^2}}{Q_h(1 - \gamma\rho)} -$$



коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и автодинной девиации частоты генерации;  $C_{OC} = \Delta\omega_a \tau$  – параметр обратной связи (ОС) системы «генератор – объект локации»;  $\Delta\omega_a = \Gamma L_a \omega_0$  – амплитуда автодинных изменений частоты;  $\psi_0 = \arctg(\kappa_{cm})$ ,  $\psi_1 = \arctg(\rho)$ ,  $\theta = \arctg(\gamma)$  – углы фазового смещения автодинного отклика;  $\rho = \varepsilon_{11}/Q_H$ ,  $\gamma = \beta/\alpha_{11}$  – коэффициенты неизодромности и неизохронности автогенератора соответственно;  $\kappa_{cd} = \varepsilon_{01}\alpha_{11}/\alpha_{01}Q_H$  – коэффициент частотного детектирования автодинных изменений частоты в изменения среднего значения тока АЭ;  $\kappa_{cm} = [(\rho - \kappa_{cd})/(1 - \kappa_{cd}\gamma)]$  – коэффициент амплитудно-частотного смещения автодинного отклика по изменению параметра смещения (тока или напряжения) на АЭ.

Здесь необходимо отметить, что зависимость функций (12) – (15) от текущего времени  $t$  обусловлена лишь зависимостью  $\tau = \tau(t)$  вследствие перемещения объекта локации. При этом для выявления в (15) фазы  $\delta(\tau)$  находим решение, используя метод последовательных приближений:

$$\delta(\tau_n) = (2\pi\tau_n)_{(0)} - C_{OC}\sin[(2\pi\tau_n)_{(1)} + 2\beta_b d + \theta - C_{OC}\sin[(2\pi\tau_n)_{(2)} + 2\beta_b d + \theta - \dots - C_{OC}\sin[(2\pi\tau_n)_{(k)} + 2\beta_b d + \theta] \dots], \quad (16)$$

где индексами в круглых скобках, как обычно, обозначен порядок приближения;  $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi$  – нормированное (безразмерное) время.

На зажимах детекторного диода VD1 (см. рис. 2, а) имеет место сложение колебаний, полученных от СВЧ генератора  $u_{AG}$  и принятых от объекта локации  $u_c$ :

$$u_{AG}(\tau) = (A_0 + a_0 K_a \cos \varphi_a) \cos \left[ \int_0^t (\omega_0 - \chi_m \sin \varphi_\chi) dt + \beta_b d \right], \quad (17)$$

$$u_c(\tau) = a_0 \cos \left[ \int_0^{t-\tau} (\omega_0 - \chi_m \sin \varphi_\chi) dt + \beta_b d \right], \quad (18)$$

где  $a_0 = \Gamma A_0$ ;  $\chi_m = \Gamma L_a \omega_0$ ;  $\varphi_a = [\delta(\tau) + 2\beta_b d - \psi_1]$ ;  $\varphi_\chi = [\delta(\tau) + 2\beta_b d + \theta]$ . В результате детектирования огибающей суммы:  $u_d(\tau) = u_{AG}(\tau) + u_c(\tau)$ , отбрасывая постоянную составляющую и учитывая при этом выполнение в (17) и (18) сильного неравенства:  $A_0 \gg a_0$ ,  $a_0 K_a$ , получим выражение для нормированного сигнала  $u_n(\tau_n)$  на выходе внешнего детектора:

$$u_n(\tau_n) = u_d(\tau_n) / a_0 = K_a \cos[\delta(\tau_n) + 3\beta_b d - \psi_1] + \cos\delta(\tau_n). \quad (19)$$

Из (13) и (19) видно, что особенности формирования сигналов в цепи питания автодина и полученного с внешнего детектора, а также их фазовые сдвиги зависят от величины коэффициента автодинного усиления  $K_a$ . После элементарных преобразований (19) получим:

$$u_n(\tau_n) = R \cos[\delta(\tau_n) + \Theta], \quad (20)$$

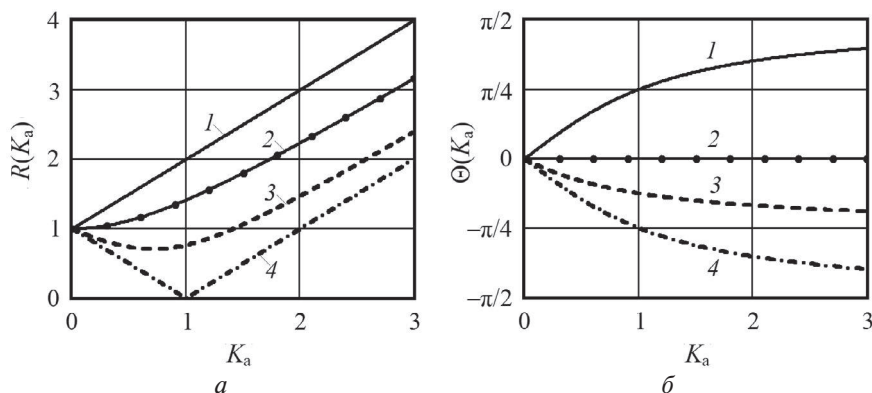


где  $R$ ,  $\Theta$  – зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от значений коэффициента автодинного усиления  $K_a$  и сдвигов фаз излучения в ЛП  $\beta_b d$  и вызванной неизотропностью генератора  $\psi_1$ :

$$R = \sqrt{1 + K_a^2 + 2K_a \cos(3\beta_b d - \psi_1)},$$

$$\Theta = \arctg \frac{K_a \sin(3\beta_b d - \psi_1)}{1 + K_a \cos(3\beta_b d - \psi_1)}. \quad (21)$$

Зависимости  $R(K_a)$  и  $\Theta(K_a)$ , рассчитанные согласно (21) при  $\psi_1 = 0$  для различных значений фазы  $\beta_b d$  представлены на рис. 3, а и б.



**Рис. 3.** Зависимости  $R(K_a)$  (а) и  $\Theta(K_a)$  (б), рассчитанные для случая  $\psi_1 = 0$  при  $\beta_b d = \pi/6$  (кривые 1),  $\beta_b d = 0$  (кривые 2),  $\beta_b d = -\pi/12$  (кривые 3),  $\beta_b d = -\pi/6$  (кривые 4)

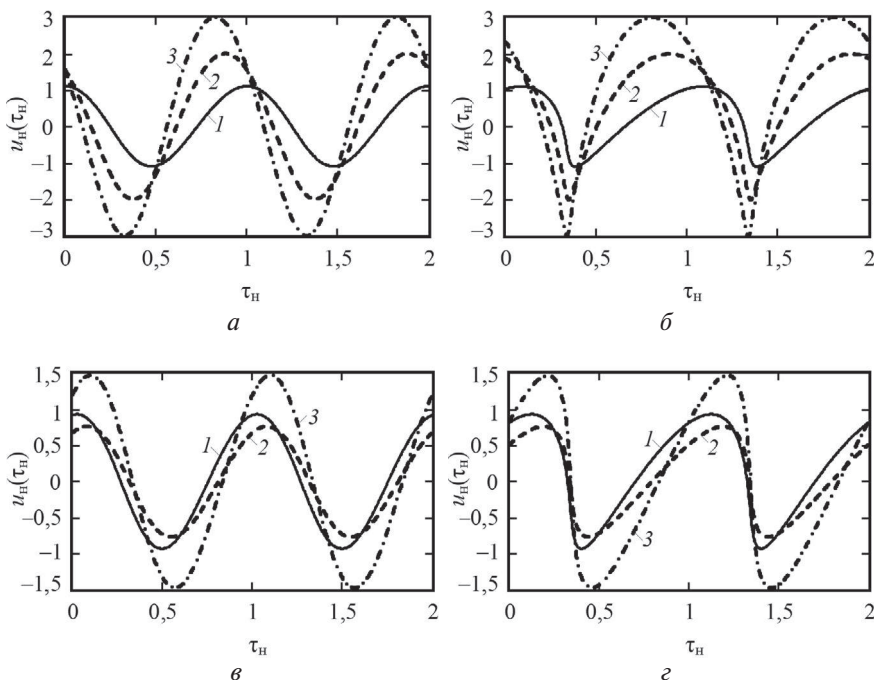
**Fig. 3.** Functions  $R(K_a)$  (a) and  $\Theta(K_a)$  (b) calculated for the case  $\psi_1 = 0$  at  $\beta_b d = \pi/6$  (curves 1),  $\beta_b d = 0$  (curves 2),  $\beta_b d = -\pi/12$  (curves 3),  $\beta_b d = -\pi/6$  (curves 4)

Из анализа кривых рис. 3 видно, что в первом случае, когда  $K_a \ll 1$ , амплитуда и фаза сигнала  $u_n(\tau_n)$  на выходе внешнего детектора определяются уровнем отраженного СВЧ излучения и слабо зависят от выбора местоположения внешнего детектора. Во втором случае, когда значения  $K_a$  большие (по крайней мере,  $K_a > 3$ ) указанные параметры сигнала в основном определяются автодинными изменениями амплитуды колебаний. В третьем случае, когда величина  $K_a$  соизмерима с единицей амплитуда и фаза сигнала  $u_n(\tau_n)$  весьма чувствительны к выбору местоположения внешнего детектора в ЛП. В некоторых случаях (см. кривую 4 на рис. 3, а при значении  $K_a = 1$ ) выходной сигнал  $u_n(\tau_n)$  может вообще отсутствовать.

Свойства сигналов (12), (13), которые регистрируются на выходе автодина, достаточно подробно изучены (см., например, [11; 16]). Здесь рассмотрим особенности сигналов  $u_n(\tau_n)$  автодина на выходе внешнего детектора, которые получаются во всех трех случаях. При

этом необходимо отметить, что отраженное излучение от объекта локализации независимо от величины отклика автодина по изменению амплитуды колебаний (13) вызывает изменения частоты генерации автодина в соответствии с (14). Амплитуда этих изменений (автодинная девиация частоты) определяется величиной произведения  $\Gamma L_a$ , которая, как видно из расшифровок к (12) – (15), непосредственно влияет на значение параметра  $C_{OC}$ .

На рис. 4 представлены временные диаграммы сигналов на выходе внешнего детектора, рассчитанные согласно (20), (21) с учетом (16) при различных значениях параметра  $C_{OC}$ , фазового угла  $\beta_v d$  и коэффициента автодинного усиления  $K_a$ . Из диаграмм рис. 4 видно, что в случае слабого сигнала, когда параметр  $C_{OC} \ll 1$ , сигналы с внешнего детектора имеют практически синусоидальный вид (см. кривые на рис. 4, а и в). В условиях сильного сигнала, когда параметр  $C_{OC}$  соизмерим с единицей, выходные сигналы с внешнего детектора подвержены искажениям. При этом характер этих искажений зависит от величины коэффициента  $K_a$  автодинного усиления и фазового расстояния  $\beta_v d$  между генераторной и детекторной секциями.



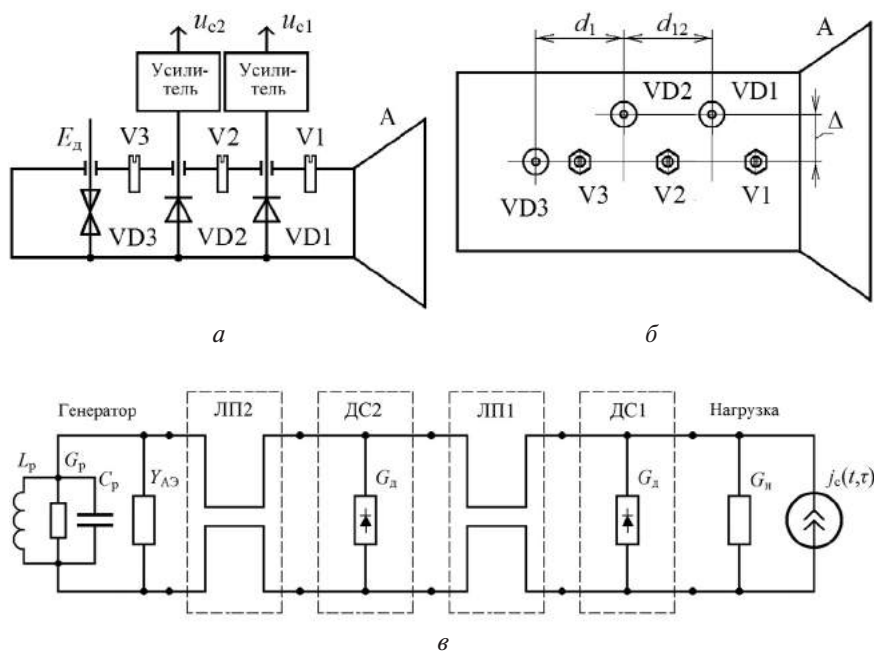
**Рис. 4.** Временные диаграммы сигналов на выходе внешнего детектора, рассчитанные при  $C_{OC} = 0,1$  (а), (в) и  $C_{OC} = 0,8$  (б), (г);  $\beta_v d = \pi/6$  (а), (б) и  $\beta_v d = -\pi/12$  (в), (г);  $K_a = 0,1$  (кривые 1),  $K_a = 1$  (кривые 2),  $K_a = 2$  (кривые 3)

**Fig. 4.** Time diagrams of signals on the external detector output calculated for  $C_{OC} = 0,1$  (a), (c) and  $C_{OC} = 0,8$  (b), (d);  $\beta_v d = \pi/6$  (a), (б) and  $\beta_v d = -\pi/12$  (в), (г);  $K_a = 0,1$  (curves 1),  $K_a = 1$  (curves 2),  $K_a = 2$  (curves 3)

Для снижения степени искажений сигналов целесообразно уменьшение величины автодинной девиации частоты  $\Delta\omega_a$ , что достигается обычно увеличением эквивалентной добротности КС, например, с помощью дополнительного высокодобротного резонатора [22].

### 3. Автодины с возможностью квадратурного детектирования

На рис. 5 представлены функциональная схема автодинного модуля (а) с возможностью квадратичного детектирования сигналов, его эскиз (б) и различной сложности эквивалентные схемы, поясняющие устройство и принцип его действия. Эквивалентная схема на рис. 5, в содержит последовательное соединение секции собственно СВЧ генератора, первую ДС1 и вторую ДС2 детекторные секции и нагрузку  $G_n$ . Четырехполюсники в виде линий передачи ЛП1 и ЛП2 без потерь имеют постоянную распространения  $\beta_v = 2\pi/\lambda_v$ , где  $\lambda_v$  – длина волны в линии, имеющей волновую проводимость  $Y_0$ . При этом эквивалентная схема, приведенная к сечению АЭ совпадает со схемой рис. 2, б.



**Рис. 5.** Функциональная схема прямо-передающего модуля (а) с возможностью квадратурного детектирования сигналов, эскиз его волноводного исполнения (б), полная эквивалентная схема модуля (в):  
А – антенна; V1, V2, V3 – регулировочные винты

**Fig. 5.** The functional diagram of the transceiver module (а) with opportunity of quadrature signal detection, the sketch of its waveguide implementation (б), the complete equivalent circuit of the module (в):  
А – an antenna; V1, V2, V3 – are adjusting screws

Секции ДС1 и ДС2 на рис. 5, в представлены средними за период колебаний резистивными проводимостями  $G_{д1}$  и  $G_{д2}$  детекторных диодов. При этом реактивной составляющей диодов, как и в предыдущем случае, мы пренебрегаем. Воздействие отраженного излучения на автодин представлено на схеме рис. 5, в генератором тока  $j_c(t, \tau)$ . Как обычно, эквивалентная схема модуля содержит среднюю за период колебаний проводимость АЭ  $Y_{АЭ} = G_{АЭ}(A, \omega) + jB_{АЭ}(A, \omega)$ , зависящую от амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний АД, а также проводимость  $Y_{КС} = G\{1 + j2Q_H[(\omega - \omega_c)/\omega_c]\}$  одноконтурной КС.

Исходное выражение для анализа схемы рис. 2, б с учетом приведенной к сечению АЭ проводимости  $Y_{вх}$  всей внешней по отношению к генератору цепи и сделанных выше замечаний имеет вид:

$$\operatorname{Re}[\dot{A}(Y_{АЭ} + Y_{КС} + Y_{вх})] = j_{вх}(t, \tau), \quad (22)$$

где  $j_{вх}(t, \tau)$  – зависящий от предыстории системы генератор тока воздействия отраженного излучения, приведенный к зажимам АЭ.

Решение уравнения (22) выполнялось, также как и в предыдущем случае методом медленно меняющихся амплитуд в допущении слабого отраженного излучения. При этом из (22) нами получены выражения сигнальных характеристик для автодинных изменений амплитуды  $A(\tau)$ , частоты  $\omega(\tau)$  колебаний и набега фазы  $\delta(\tau)$  отраженного излучения:

$$A(\tau) = A_0 \{1 + \Gamma K_a \cos[\delta(\tau) - \psi]\}, \quad (23)$$

$$\omega(\tau) = \omega_0 \{1 - \Gamma L_a \sin[\delta(\tau) + \theta]\}, \quad (24)$$

$$\delta(\tau) = \omega_0 \tau - \Delta\varphi_0 - C_{OC} \sin[\delta(\tau) + \theta], \quad (25)$$

где  $\Delta\varphi_0 = \varphi_{02} - \varphi_{01} = 2\beta_b(d_2 + d_{12}) = 2\beta_b d_1$ ;  $d_1 = d_2 + d_{12}$ ;  $d_1, d_2$  – расстояния между сечениями диодов VD1, VD3 и VD1, VD3 соответственно;  $d_{12} = d_1 - d_2$ .

На зажимах детекторных диодов VD1 и VD2 имеет место сложение колебаний, полученных от генератора  $u_{АГ1}(t)$ ,  $u_{АГ2}(t)$  и принятых от объекта локации  $u_{с1}(t)$ ,  $u_{с2}(t)$  соответственно:

$$u_{АГ1}(t) = A_0 \{1 + \Gamma K_a \cos[\delta(\tau) - \psi]\} \times \\ \times \cos \left[ \int_0^t \omega_0 \{1 - \Gamma L_a \sin[\delta(\tau) + \theta]\} dt - \beta_b d_1 \right], \quad (27)$$

$$u_{АГ2}(t) = A_0 \{1 + \Gamma K_a \cos[\delta(\tau) - \psi]\} \times \\ \times \cos \left[ \int_0^t \omega_0 \{1 - \Gamma L_a \sin[\delta(\tau) + \theta]\} dt - \beta_b d_2 \right], \quad (28)$$

$$u_{c1}(t) = \Gamma A_0 \cos \left[ \omega_0 \int_0^{t-\tau} \{1 - \Gamma L_a \sin[\delta(\tau) + \theta]\} dt - \beta_b d_1 \right], \quad (29)$$

$$u_{c2}(t) = \Gamma A_0 \cos \left[ \omega_0 \int_t^{t-\tau} \{1 - \Gamma L_a \sin[\delta(\tau) + \theta]\} dt - \beta_b (d_1 + d_{12}) \right]. \quad (30)$$

В результате детектирования огибающей суммы колебаний (27) и (29) на первом диоде:  $u_{d1}(t) = u_{A\Gamma1}(t) + u_{c1}(t)$ , и колебаний (28) и (30) на втором диоде:  $u_{d2}(t) = u_{A\Gamma2}(t) + u_{c2}(t)$ , отбрасывая постоянную составляющую и учитывая при этом выполнение в (27), (28) и (29), (30) сильных неравенств:  $A_0 \gg \Gamma K_a$ ,  $\omega_0 \gg \Gamma L_a$ ,  $\Gamma \ll 1$ , получим окончательные выражения для выходных нормированных сигналов детекторных диодов:

$$\begin{aligned} u_{n1}(\tau_n) &= u_{d1}(\tau_n) / \Gamma = \\ &= K_a \cos[\delta(\tau_n) - \psi] + \cos\{2\pi\tau_n - C_{OC} \sin[\delta(\tau_n) + \theta]\}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} u_{n2}(\tau_n) &= u_{d2}(\tau_n) / \Gamma = K_a \cos[\delta(\tau_n) - \psi] + \\ &+ \cos\{2\pi\tau_n + 2\beta_b d_{12} - C_{OC} \sin[\delta(\tau_n) + \theta]\}. \end{aligned} \quad (32)$$

Из (31) и (32) видно, что особенности формирования сигналов, а также их фазовые сдвиги зависят от величины коэффициента автодинного усиления  $K_a$ , величины пространственного разнosa  $d_{12}$  диодов в линии передачи, уровня отраженного излучения и внутренних параметров СВЧ генератора. В случае высокого значения  $K_a$ , когда  $K_a \gg 1$ , оба сигнала на выходе детекторов находятся в фазе и определяются автодинным эффектом используемого генератора. В случае выполнения обратного неравенства реализуется сдвиг фаз между сигналами  $\Delta\varphi = 2\beta_b d_{12}$ , определяемый относительным разносом между диодами в передающей линии. Так, при разносе  $d_{12} = (2n + 1)\lambda_b/2$ , где  $n$  – натуральные числа, сдвиг фаз между сигналами находится в квадратуре:  $\Delta\varphi = \pi/2$ .

Как показали результаты расчетов сигнальных характеристик (31) – (32), в случае, когда коэффициент автодинного усиления  $K_a$  соизмерим с единицей, выходные сигналы и их относительные фазовые смещения сложным образом зависят от разнosa между диодами  $d_{12}$ . Кроме того, во всех рассматриваемых случаях степень искажения сигналов зависит также от величины параметра  $C_{OC}$ . Для уменьшения этих искажений, как выше отмечалось, обычно рекомендуется использование генератора с дополнительным высокочастотным резонатором [22]. Интересным представляется также решение, основанное на выборе такого режима работы СВЧ генератора, при котором параметры  $K_a$  и  $C_{OC}$  имеют малые значения [11]. Кроме того, для решения указан-

ной проблемы представляет интерес применение взаимно синхронизированных автодинов [23].

#### 4. Результаты экспериментов

В качестве объекта исследований мы сначала использовали приемо-передающий модуль, описанный в [24]. Модуль состоит из секции передатчика на диоде Ганна и секции приемника в виде балансного детектора на диодах с барьером Шоттки. Секции передатчика и приемника размещены в разных отрезках прямоугольных волноводов, соединенных между собой по широкой стенке и работающих на общую антенну. В волноводном канале передатчика диод Ганна установлен на расстоянии, кратном примерно половине длины волны в волноводе, считая от торцевой стенки. Диоды с барьером Шоттки балансного детектора установлены в волноводе приемника в одной плоскости встречно друг другу. Часть мощности передатчика, используемая как мощность гетеродина, подается из канала передатчика через волноводно-коаксиальный переход в канал приемника. Центральный проводник коаксиальной линии подключается к общей точке соединения диодов с барьером Шоттки. Такая конструкция обеспечивает одинаковую мощность гетеродина на диодах балансного детектора.

Рабочая частота модуля 37,5 ГГц, выходная мощность около 20 мВт, коэффициент усиления антенны 26 dB, напряжение питания диода Ганна 4 В, его потребляемый ток около 1 А. Общий вид модуля, соединенного с рупорно-линзовой антенной, представлен на рис. 6, а.

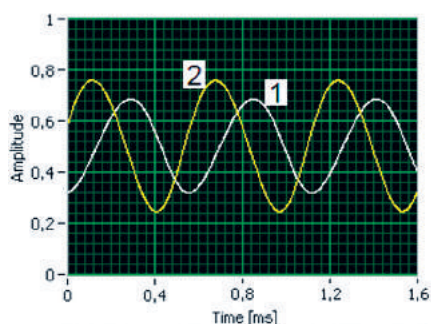
В качестве отражающего объекта локации использовался электро-механический имитатор доплеровского сигнала, обеспечивающего линейность и равномерность изменения фазы отраженного излучения в пределах нескольких длин волн [16; 22]. Имитатор устанавливался на расстоянии 5 м от приемопередающего модуля. К нему подключалась рупорная антенна с усилением около 20 dB. Диаграммы направленности обеих антенн (модуля и имитатора) направлялись встречно и в одной поляризации. Уровень отраженного излучения регулировался переменным аттенуатором, включенным между имитатором и антенной. Полученные при этом осциллограммы сигналов для двух случаев (слабого и сильного) отраженного излучения представлены на рис. 6, б и в.

Из сравнения временных диаграмм сигналов, представленных на рис. 4, и полученных нами экспериментально осциллограмм (см. рис. 6, б и в) видно их качественное соответствие. Отсюда следует адекватность разработанной нами математической модели процессов формирования сигналов в автодинах с внешним детектором.

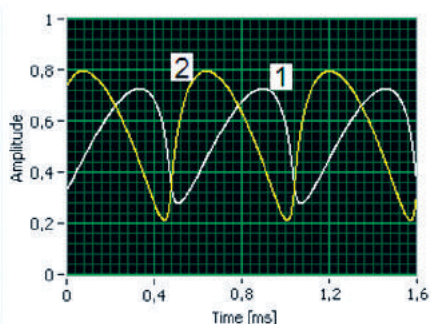




а



б



в

**Рис. 6.** Общий вид автодинного приемо-передающего модуля (а) и осциллограммы сигналов, полученные на выходе внешнего детектора (кривые 1) и в цепи питания диода Ганна (кривые 2) для случая слабого ( $C_{oc} \approx 0,1$ ) (б) и сильного сигнала ( $C_{oc} \approx 0,8$ ) (в)

**Fig. 6.** The overall view of the autodyne transceiver module (a) and signal oscillograms obtained on the output of the external detector (curves 1) and in the power supply circuit of the Gunn diode (curves 2) for the case of weak ( $C_{oc} \approx 0,1$ ) (b) and strong signal ( $C_{oc} \approx 0,8$ ) (c)

Второй эксперимент выполнялся с макетом автодинного модуля, содержащим две соединенные последовательно детекторные секции. Они находились между генераторной секцией и антенной. Кроме того модуль отличался наличием ферритового вентиля, включенного в волноводный тракт между генераторной и детекторной секцией. Подбор расстояния между детекторными секциями для получения сигналов в квадратуре выполнялся установкой пластинок различной толщины с волноводным окном в их центре.

В результате описанной настройки модуля на лабораторном стенде с доплеровским имитатором были получены на выходах детекторных диодов квадратурные сигналы, подобные представленным на рис. 6, б. При этом амплитуда сигнала с первого диода (считая от антенного выхода) примерно в 2 раза больше, чем со второго диода. Для выравнивания их амплитуд необходима регулировка связи диодов с линией



передачи. Однако конструкция детекторных камер не позволяла выполнить эту регулировку. Поэтому с помощью этого макета была показана лишь принципиальная возможность реализации модуля с квадратурными сигналами.

## 5. Выводы

Разработана математическая модель автодинного датчика с внешними детекторами. Получены основные соотношения для расчета его сигнальных характеристик при регистрации сигналов в цепи питания генератора и с помощью внешних детекторов, устанавливаемых между генераторной секцией и антенной. Из результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований следует, что формирование сигналов, снимаемых с внешнего детектора, а также их фазовые сдвиги относительно сигналов, регистрируемых в цепи питания генератора, зависят как от величины коэффициента автодинного усиления генератора, так и от фазового расстояния между секциями.

Установлено, что в автодинном модуле с двумя внешними детекторами в случае высокого значения коэффициента автодинного усиления оба сигнала, получаемые на выходах детекторов, находятся в фазе. В случае малой величины коэффициента автодинного усиления на выходе этих секций реализуется сдвиг фаз между сигналами, который определяется относительным разносом между диодами в передающей линии. При разносе диодов кратно нечетному числу в одну восьмую длины волны в линии, сдвиг фаз между сигналами находится в квадратуре.

Для уменьшения степени искажения сигналов целесообразно снижение величины автодинной девиации частоты. Это достигается или увеличением эквивалентной добротности колебательной системы (применением стабилизации частоты с помощью дополнительного высокочастотного резонатора) или использованием вентиля между секцией генератора и диодной секцией. Кроме того, возможно применение автодина с синхронизацией частоты от дополнительного маломощного СВЧ генератора.

Из результатов выполненных исследований следует вывод о перспективности разработки интегральных автодинных модулей с квадратурным детектированием на основе отечественной элементной базы. При этом необходимо дополнительно решить конструкторско-технологические вопросы, связанные с освоением монолитных интегральных схем квадратурных детекторов, а также СВЧ генераторов на диоде Ганна, интегрированных с высокочастотным резонатором. Это позволит свести технологию изготовления приемо-передающих модулей к принципу «поставил и забыл», что значительно снижает их себестоимость.

## Литература

1. Nguyen C., Kim S. *Theory, analysis and design of RF interferometric sensors*. Springer Science+Business Media; 2012.
2. Kim S. *Development of millimeter wave integrated-circuit interferometric sensors for industrial sensing applications*. A Dissertation doctor of philosophy, Submitted to Texas A&M University; 2004.
3. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler radar physiological sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016.
4. Kim S., Nguyen C. A Displacement measurement technique using millimeter-wave interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812575
5. Komarov I.V., Smolskiy S.M. *Fundamentals of short-range FM Radar*. Norwood: Artech House; 2003.
6. Usanov D.A., Skripal A.I.V., Skripal An.V., Postelga A.E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693.
7. Usanov D.A., Postelga A.E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011;45(1):6–8.
8. Noskov V.Ya., Ermak G.P. Signal and fluctuation characteristics of autodyne vibration and displacement meters. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014;73(19):1727–1743. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.30
9. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Двухдиодный автодин в системах радиоволнового контроля динамических процессов. *Датчики и системы*. 2016;(6):31–37.
10. Носков В.Я., Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Закарянюк Н.М., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 9. Радиолокационное применение автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016;(3):32–86.
11. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А., Мишин Д.Я., Чупахин А.П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 10. Основы анализа и расчета параметров автодинов с учетом шумов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2018;(3):18–52.
12. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Принципы построения автодинных передатчиков. В: 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), Севастополь, 10–16 сентября 2017 г. М.; Минск; Севастополь; 2017. Т. 6. С. 1382–1388.
13. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. *Electronics and Communications in Japan*. 1975;58-B(5):60–66.
14. Roskoni U. Method and apparatus for measuring a vehicle's own speed by the Doppler radar principle. *Pat. US 4980633*, Patented Dec. 25, 1990, filed Mar. 2, 1990.

15. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1985;10(2):138–143. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145094
16. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–42.
17. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Фазовые соотношения автодинных сигналов при внешнем детектировании В: *27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), Севастополь, 10–16 сентября 2017 г.* М.; Минск; Севастополь; 2017. Т. 6. С. 1389–1395.
18. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Квадратурное детектирование сигналов в автодинных системах. В: *28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018), Севастополь, 9–15 сентября 2018 г.* М.; Минск; Севастополь; 2018. Т. 6. С. 1429–1435.
19. Носков В.Я., Смольский С.М. Регистрация автодинного сигнала в цепи питания генераторов на полупроводниковых диодах СВЧ. (Обзор). *Техника и приборы СВЧ*. 2009;(1):14–26.
20. Kurokava K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293
21. Носков В.Я., Игнатков К.А. О применимости квазистатического метода анализа автодинных систем. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2014;57(3):44–56. DOI: 10.20535/S0021347014030054
22. Носков В.Я., Игнатков К.А. Шумовые характеристики автодинов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. *Радиотехника и электроника*. 2016;61(9):905–918. DOI: 10.7868/S0033849416090102
23. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Автодинный эффект системы двух взаимно синхронизированных генераторов при сильной связи. *Радиотехника и электроника*. 2018;63(2):200–208. DOI: 10.7868/S0033849418020122
24. Соловьев Ю.Л., Рудаков А.В. Малогабаритное устройство миллиметрового диапазона для систем ближней радиолокации. В: *19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009), Севастополь, 14–18 сентября 2009 г.* Севастополь; 2009. С. 113.

## References

1. Nguyen C., Kim S. *Theory, analysis and design of RF interferometric sensors*. Springer Science+Business Media; 2012.
2. Kim S. *Development of millimeter wave integrated-circuit interferometric sensors for industrial sensing applications*. A Dissertation doctor of philosophy, Submitted to Texas A&M University; 2004.

3. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler radar physiological sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016.
4. Kim S., Nguyen C. A Displacement measurement technique using millimeter-wave interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812575
5. Komarov I.V., Smolskiy S.M. *Fundamentals of short-range FM Radar*. Norwood: Artech House; 2003.
6. Usanov D.A., Skripal A.I., Skripal A.V., Postelga A.E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693.
7. Usanov D.A., Postelga A.E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011;45(1):6–8.
8. Noskov V.Ya., Ermak G.P. Signal and fluctuation characteristics of autodyne vibration and displacement meters. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014;73(19):1727–1743. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.30
9. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P. Application of a double-diode autodyne in radiowave monitoring systems of dynamic processes. *Datchiki & Systemi = Sensors & Systems*. 2016;(6):31–37. (In Russ.)
10. Noskov V.Ya., Varavin A.V., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Zakarlyuk N.M., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter wave ranges and their application. Part 9. Autodyne radar applications. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*. 2016;(3):32–86. (In Russ.)
11. Noskov V.Ya., Smolskiy S.M., Ignatkov K.A., Mishin D.Ya., Chupahin A.P. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and MM-wave ranges and its applications. Part 10. Fundamentals of analysis and calculation of autodyne parameters taking noises into account. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*. 2018;(3):18–52. (In Russ.)
12. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P. Construction principles of autodyne transceivers. In: *27<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2017), Sevastopol, September 10–16, 2017*. Moscow; Minsk; Sevastopol; 2017. Vol. 6, pp. 1382–1388. (In Russ.)
13. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. *Electronics and Communications in Japan*. 1975;58-B(5):60–66.
14. Roskoni U. Method and apparatus for measuring a vehicle’s own speed by the Doppler radar principle. *Pat. US 4980633*, Patented Dec. 25, 1990, filed Mar. 2, 1990.
15. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1985;10(2):138–143. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145094
16. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Autodyne characteristic dependence on the UHF oscillator’s inherent parameters. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2012;(6):24–42. (In Russ.)

17. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P. Phase relations of autodyne signals at external detection. In: *27<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2017), Sevastopol, September 10–16, 2017*. Moscow; Minsk; Sevastopol; 2017. Vol. 6, pp. 1389–1395. (In Russ.)
18. Noskov V.Ya., Smolskiy S.M., Ignatkov K.A., Chupahin A.P. Quadrature Detection of Signals in Autodyne Systems. In: *28<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2018), Sevastopol, September 9–15, 2018*. Moscow; Minsk; Sevastopol; 2018. Vol. 6, pp. 1429–1435. (In Russ.)
19. Noskov V.Ya., Smolskiy S.M. Autodyne signal registration in a power circuit of the semiconductor diode oscillator in microwave and millimeter ranges (Review). *Tekhnika i pribory SVCh*. 2009;(1):14–26. (In Russ.)
20. Kurokava K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293
21. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. About applicability of quasi-static method of autodyne systems analysis. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2014;57(3):44–56. (In Russ.) DOI: 10.20535/S0021347014030054
22. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Noise characteristics of autodynes with frequency stabilization by means of an external high-Q cavity. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016;61(9):1052–1063. DOI: 10.1134/S1064226916090102
23. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P. Autodyne effect of the system involving two mutually synchronized oscillators under strong coupling. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018;63(2):180–188. DOI: 10.1134/S1064226918020080
24. Solovyov Y.L., Rudakov A.V. The miniature module MM-wave range for radar systems. In: *18<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2009), Sevastopol, September 14–18, 2009*. Sevastopol; 2009, p. 113. (In Russ.)

## Информация об авторах

**Носков Владислав Яковлевич** — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

**Смольский Сергей Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры Формирования и обработки радиосигналов, заместитель директора Института радиотехники и электроники, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.

**Игнатков Кирилл Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный

университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

**Чупахин Андрей Павлович** – аспирант кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

### Information about the authors

**Vladislav Ya. Noskov** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**Sergey M. Smolskiy** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Formation and Processing of Radio Signals Department, Deputy Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics, MEI of the National Research University “MEI”, Moscow, Russia.

**Kirill A. Ignatkov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**Andrey P. Chupahin** – Postgraduate Student, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Поступила / Received: 12.12.2018

Принята в печать / Accepted: 28.12.2018